COMENTARIOS AL ESCALAMIENTO DE SISMOS DEL ASCE 2010

Roberto Aguiar Falconí(1), Paola Villalba(2), Henry García(1)

(1)Departamento Ciencias de la Tierra y Construcciones
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE,
Av. Rumiñahui S/N Valle de Los Chillos Ecuador

(2)Maestría en Estructuras y Ciencias de los materiales
Universidad Central del Ecuador Quito Ecuador

RESUMEN

El ASCE (American Society of Civil Engineers) de 2010 propone una metodología para encontrar acelerogramas compatibles con un espectro de diseño en un rango de periodo determinado. En esta forma de cálculo se determinan dos factores, el primero corresponde a la norma Euclidiana, y el segundo es un ajuste propuesto por el ASCE. El grupo de acelerogramas que van a ser escalados se multiplicarán por el producto de estos dos factores.

En este artículo se demuestra que cuando el periodo de la estructura es bajo, se obtiene mejor ajuste únicamente multiplicando por el primer factor. Cuando el periodo de vibración de la estructura es alto, si es adecuado la multiplicación por los dos factores.
Palabras Claves.- Acelerogramas, Espectros de Diseño. Periodos de estructuras. Escalamiento de sismos.

ABSTRACT

The ASCE (American Society of Civil Engineers) 2010 proposes a methodology to find accelerograms compatible with design spectrum in the range specified period. This way of calculating two factors are determined, the first is the Euclidean norm, and the second is an adjustment proposed by the ASCE. The group will be accelerograms scaled be multiplied by the product of these two factors.

This article shows that when the period of the structure is low, best fit is obtained only by multiplying the first factor. When the period of vibration of the structure is high, if it is right multiplication by two factors.

Keywords.- Accelerograms, Design Spectra. Periods of structures. Scaling earthquakes.

Recibido: Enero de 2014
Aceptado: Marzo de 2014

1 INTRODUCCIÓN

En estudios de Peligrosidad Sísmica se obtiene espectros de diseño, los mismos que están orientados al uso del Método de Superposición Modal para encontrar la respuesta sísmica de la estructura. Ahora bien, cuando se desea encontrar la respuesta en el tiempo ya sea lineal o no lineal se necesita trabajar con acelerogramas.

En este contexto se debe manifestar que existen técnicas para encontrar acelerogramas sintéticos compatibles con todo el espectro. Uno de los programas muy utilizados es el programa SYNPRO desarrollado por Durán (2002), en esta caso se ingresan como datos el espectro de velocidad y parámetros como el tiempo de duración del sismo que se desea generar, de igual manera se elige una función de intensidades y los tiempos que tienen cada una de sus fases; también se requiere como dato un valor mínimo de la frecuencia que se desea tenga el acelerograma sintético y un valor máximo del mismo.

El problema que se tiene al trabajar de esta manera es que el acelerograma que se halla se ajusta muy bien al espectro de diseño, pero es un acelerograma muy fuerte, que muy difícilmente va a ser soportado por la estructura debido a la definición misma del espectro, por este motivo es que se han desarrollado procedimientos para encontrar acelerogramas escalados cuyo valor medio de esos espectros se aproxime en forma satisfactoria con el espectro de diseño, pero en un cierto rango de periodos.

Uno de esos métodos es el propuesto por el ASCE 2010 que se va a presentar a continuación. Se destaca que este método es muy apropiado para periodos de la estructura bastantes altos, cuando esto no sucede, en este artículo se demuestra que es suficiente multiplicar únicamente por el factor de la norma Euclidiana.

2 ESCALAMIENTO DE SISMOS DE ACUERDO AL ASCE

El IBC 2006 (International Building Code) y el CBC 2007 (California Building Code), indican que cuando se requiere un análisis dinámico no lineal para la verificación del diseño de estructuras, se debe seguir lo indicado en la ASCE/SEI 7 sección 16-2.

Se describirá a continuación el procedimiento empleado en el ASCE/SEI 7 para escalamiento de sismos:

1. Para cada uno de los sismos considerados, se calcula la respuesta espectral *A(T)* para un amortiguamiento del 5 por ciento y el vector A de valores espectrales para 300 periodos *T* espaciados logarítmicamente para el rango de periodo entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$. Siendo T_n el periodo de vibración fundamental de la estructura.

2. Se obtiene un pseudo espectro de aceleración objetivo $\hat{A}$ como la media geométrica espectral de los registros. $\hat{A}$ se define como un vector de valores espectrales máximos $\hat{A}_i$ a periodos T en el rango de periodo entre $0,2T_n$ a $1,5T_n$.

   Este espectro objetivo $\hat{A}$ puede ser también el espectro de diseño que se utilizó en el Análisis Sísmico de una estructura por el Método de Superopisción Modal y ahora se desea encontrar acelerogramas compatibles con ese espectro para un rango de períodos para encontrar la respuesta en el tiempo.

3. Se calcula el factor de escalamiento SF_1 para minimizar la diferencia entre el espectro objetivo $\hat{A}(T)$ (Paso 2) y el espectro de respuesta $A(T)$ (Paso 1) por solución del siguiente problema de minimización para cada movimiento sísmico:

$$min_{SF_1} \|\log(\hat{A}) - \log(SF_1 \times A\| \rightarrow SF_1 \quad (1)$$

   Donde ‖ . ‖ es la norma Euclidiana. Se requiere para este propósito un método numérico que minimice las funciones escalares de una variable; estos métodos están disponibles en los libros de texto sobre optimización numérica (por ejemplo, Nocedal and Stephen, 2006). Esta minimización asegura que cada espectro de respuesta escalado esté muy cerca del espectro objetivo, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 1.

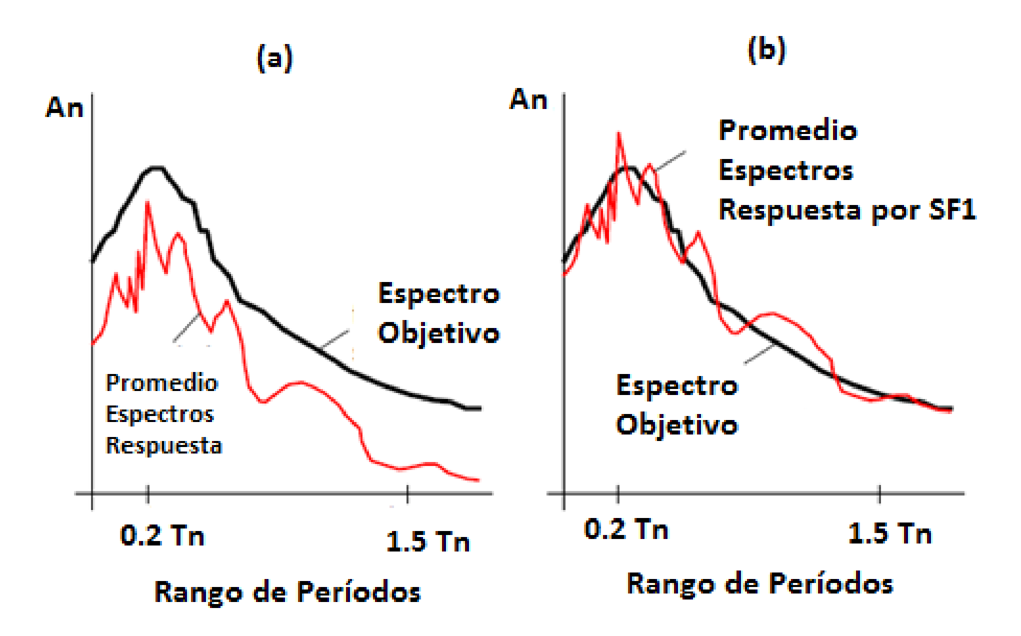


Figura 1 Descripción del paso 3 de la metodología

4. Aleatoriamente se selecciona un set de *m* movimientos sísmicos para ser utilizados en el análisis dinámico no lineal. No más de dos registros de un mismo evento deben estar incluidos en el mismo set, de modo que no hayan eventos dominantes.

5. Se calcula la máxima diferencia normalizada $\hat{A}_{escalado}$ para el espectro promedio escalado definido como el promedio de los espectros escalados SF_1 X *A* del set de *m* registros. Las ordenadas del espectro escalado pueden ser más pequeñas que las ordenadas del espectro objetivo en los mismos periodos.

6. Se calcula la máxima diferencia normalizada ε_{ASCE} entre el espectro objetivo $\hat{A}$ y el espectro promedio escalado $\hat{A}_{escalado}$ en un rango de periodos entre 0,2T_n a 1,5T_n. De tal forma que se tiene:

$$\varepsilon_{ASCE} = MAX_{0.2\,T_n \,\leq T_i \leq 1.5\,T_n} \left(\frac{\hat{A}_{i-} \;\hat{A}_{ESCALADO,i}}{\hat{A}_i} \right) \tag{2}$$

Donde $\hat{A}_i$ y $\hat{A}_{ESCALADO,i}$ son las ordenadas del espectro de aceleración objetivo y el espectro promedio escalado para un periodo T_i respectivamente. A la izquierda de la figura 2 se aprecia que para un período T_i la diferencia en las ordenadas espectrales del espectro objetivo y del espectro escalado por el factor SF_1 es igual a $\varepsilon_{ASCE}\,\hat{A}_i$. Para que este valor coincida con el espectro objetivo se multiplica por el factor SF_2 como se observa a la derecha de la figura 2. Este factor se obtiene con la siguiente ecuación.

$$SF_2 = (1 - \varepsilon_{ASCE})^{-1} \tag{3}$$

7. Se determina el factor de escala final, SF se halla multiplicando estos dos factores, para cada uno de los sismos considerados.

$$SF = SF_1\,SF_2 \tag{4}$$

Escalando los movimientos sísmicos por el factor de escala SF se asegura que el valor promedio de la respuesta espectral del set de movimientos seleccionados no es menor que el espectro objetivo para periodos en el rango de periodo entre 0,2T_n a 1,5T_n.

Pero tampoco interesa que el espectro escalado por SF tenga ordenadas espectrales mucho más grandes que el espectro objetivo, por este motivo se desarrolló este artículo para que se vea en que rangos de períodos es suficiente solo considerar SF_1 y en que otro rango el factor SF.

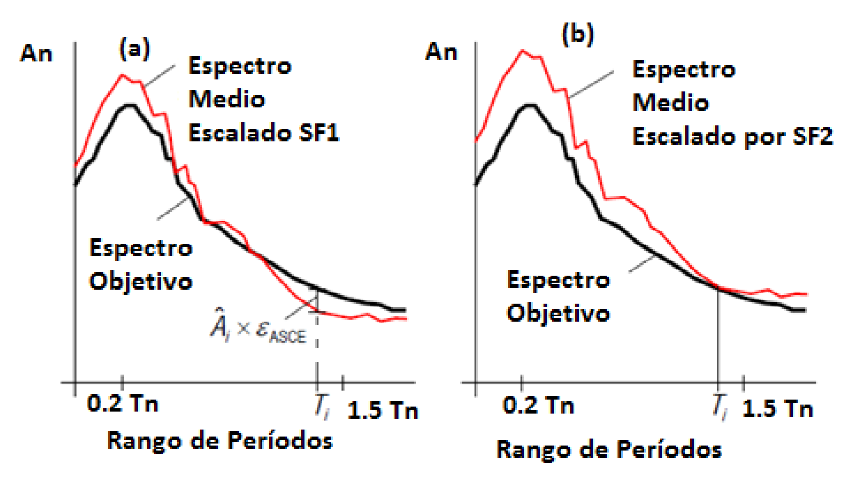


Figura 2 Descripción del paso 6 de la metodología.

3 SISMOS DE ANÁLISIS

De acuerdo a la ASCE/SEI 7, los registros sísmicos deben ser seleccionados de eventos, magnitudes, distancia de falla y mecanismo focales consistentes con el máximo sismo considerado. Para el análisis en dos dimensiones de edificios simétricos en planta, la ASCE/SEI 7 indica que se necesita que los registros se escalen de tal manera que el espectro de pesudo – aceleración promedio del set de registros no sea menor que el espectro de diseño para periodos entre 0,2T_n a 1,5T_n. Para análisis en tres dimensiones, los registros sísmicos deben consistir en dos componentes horizontales de movimiento sísmico. Para cada par de componentes horizontales, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los espectros debe ser obtenida (este espectro se denominará espectro SRSS). Cada par de registros es escalado con el mismo factor, de tal manera que el promedio de los espectro SRSS para todos los pares de componentes horizontales en el set, no sea menor que el espectro de diseño en el rango de periodos desde 0.2T_n a 1.5T_n.

A pesar que en la ASCE/SEI 7 se indica que no se considere dos registros de un mismo evento, a fines de esta investigación se han seleccionado cinco registros, cada uno con dos componentes horizontales de movimiento sísmico de diferentes estaciones del sismo de Northridge de 1994. Esto únicamente para mostrar con detalle el marco teórico del escalamiento de sismos.

Con la ayuda del programa DEGTRA, elaborado en la Universidad Autónoma de México, después de cargar el registro acelerográfico de cada componente de los cinco registros sísmicos, se obtuvo el espectro elástico de aceleraciones de los registros sísmicos considerados.

En la figura 3 se presenta la media aritmética de la respuesta espectral de las componentes x e y de los movimientos sísmicos sin escalar.

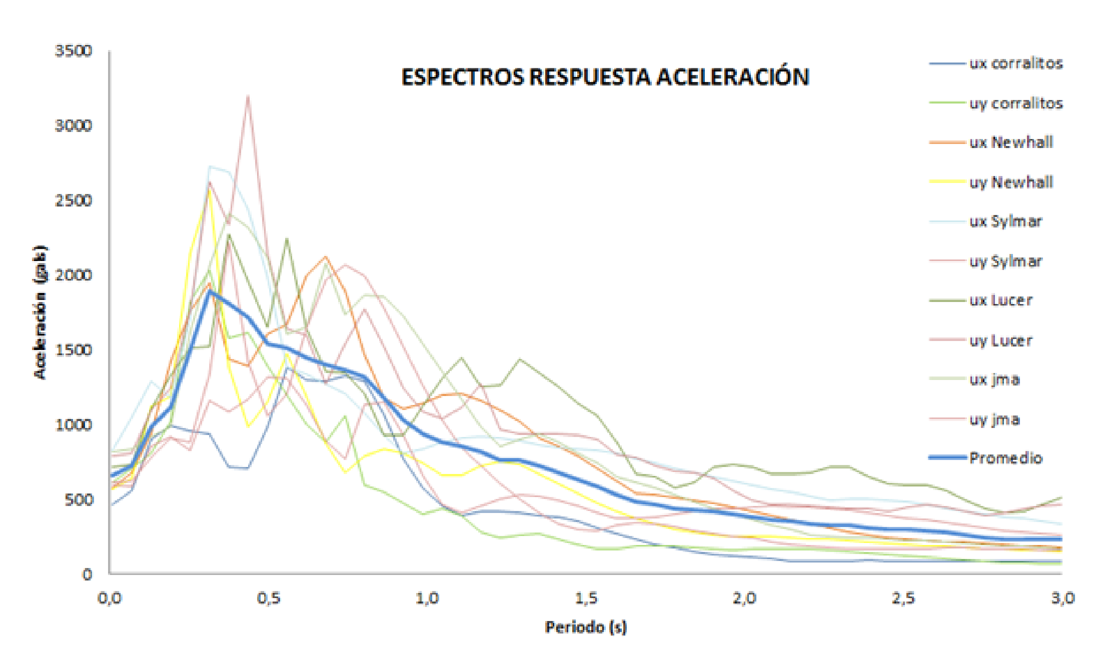


Figura 3: Espectros de respuesta de aceleración sin escalar

4 ESPECTRO CONSIDERADO

Para la obtención del espectro de diseño objetivo a considerar en el escalamiento de los registros sísmicos, se utilizó los estudios realizados por la ERN 2012. (Aguiar, 2013). En las estructuras a analizar, se asumieron los factores de sitio para la Zona Centro Norte de Quito, sector 38, barrio Quito Tenis:

Fa = 1,155 (factor que amplifica las ordenas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca)

Fd = 0,575 (factor del comportamiento inelástico, degradación del periodo del sitio y desplazamientos relativos para los espectros de aceleraciones y desplazamientos)

Fs = 1,790 (factor del comportamiento inelástico, degradación del periodo del sitio y desplazamientos relativos para los espectros de aceleraciones y desplazamientos)

Para el factor de reducción de resistencia sísmica R, de acuerdo a lo establecido en la NEC-11 (Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011), se consideró un valor de 6 para pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas descolgadas.

5 ESTRUCTURAS DE ANÁLISIS

Se analizaron dos estructuras con la misma planta, pero en elevación distinta: de ocho y dos pisos, (figuras 4 y 5) utilizando el método de análisis modal espectral. Se identificaron los grados de libertad, secciones, para calcular las matrices de rigidez en coordenadas de piso para cada uno de los pórticos. Se condensaron las mismas en dos matrices de rigidez laterales tanto en el sentido x como en y.

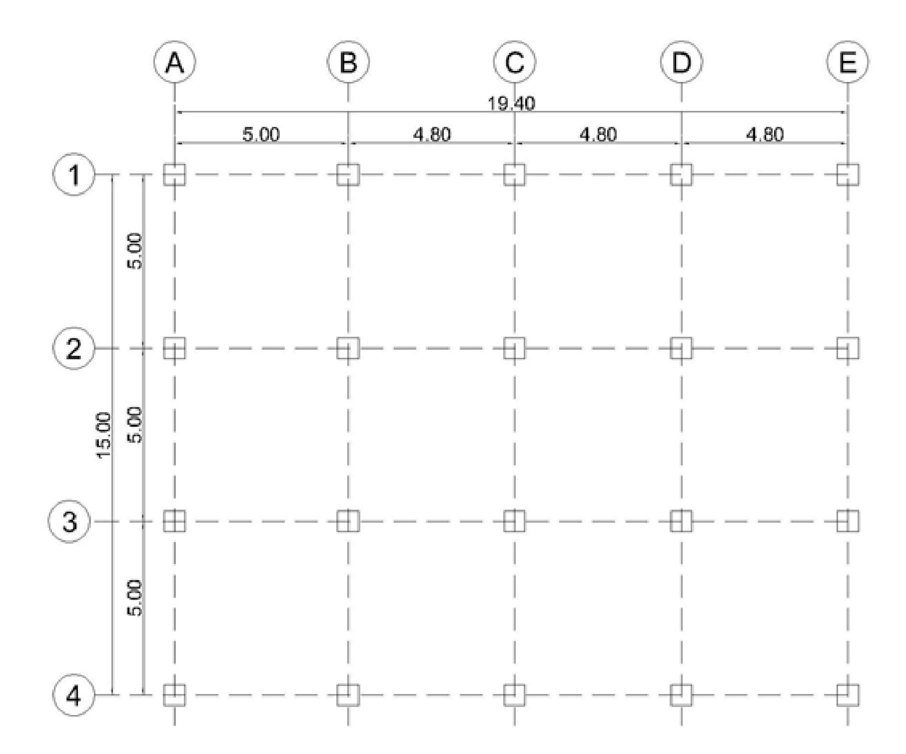
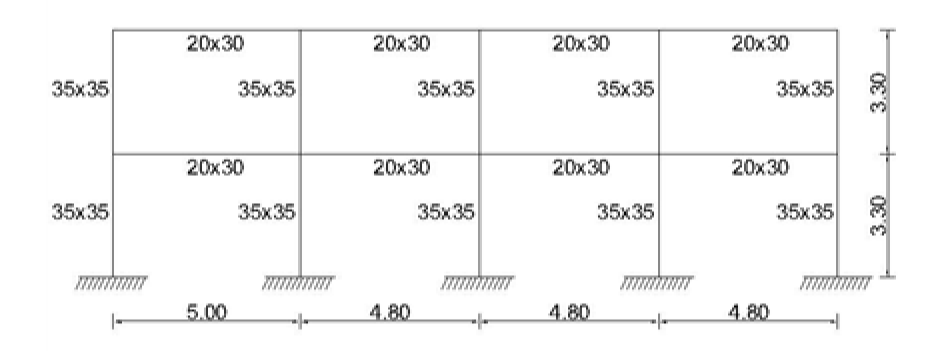


Figura 4 Planta de las estructuras de análisis

A partir de estas matrices y de la matriz de masas, se obtuvo la matriz de rigidez espacial de acuerdo al sentido de análisis, y utilizando el programa ***orden_eig*** de la librería de ***CEINCI-LAB***, basado en el Método de Jacobi para encontrar los valores y vectores propios de una matriz simétrica, se encontraron los periodos para cada modo de vibración.

Para la estructura de dos pisos, el periodo de vibración fundamental de la estructura T_n es de 0,67 y para la de ocho pisos es de 1,47. A partir de estos valores se calculó el rango de periodos donde se escalarán los sismos, esto es entre $0.2T_n$ a $1.5T_n$.



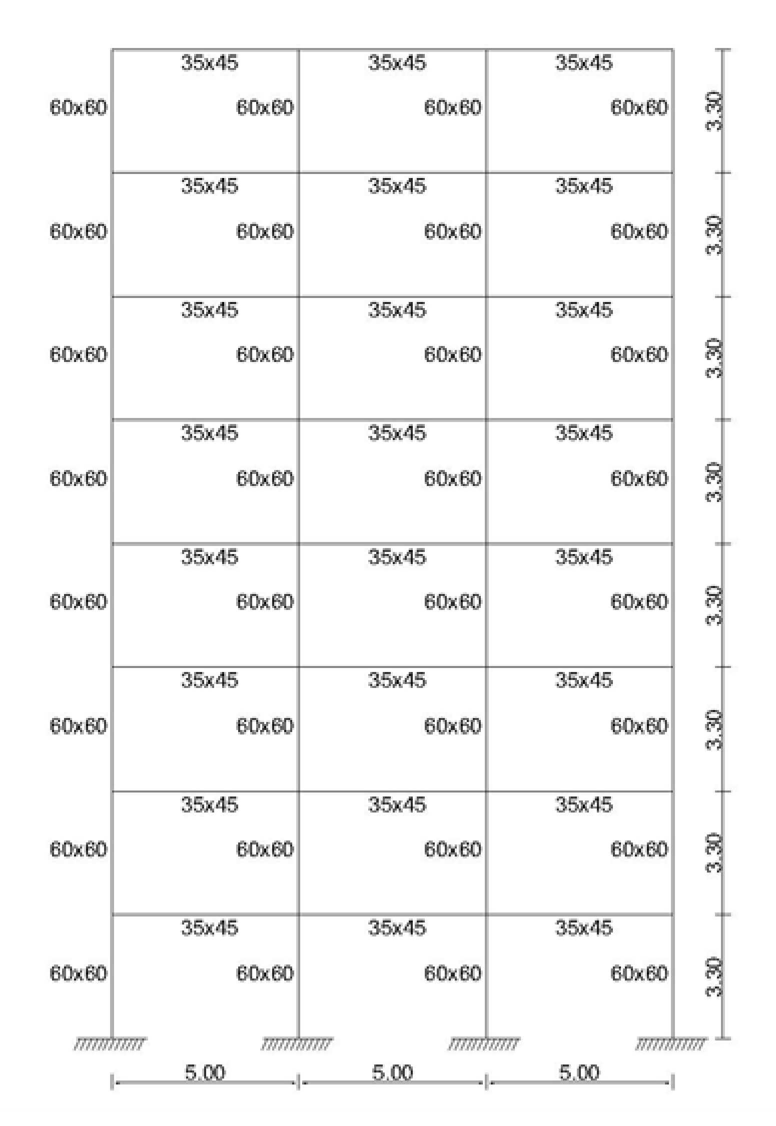


Figura 5 Elevación de las estructuras de análisis

6 RESULTADOS

Utilizando el programa ***ESCALAMIENTOCOM*** de la librería de ***CEINCI-LAB***, ingresando como parámetros los límites inferior y superior del rango en el que se necesita se escalen los sismos ($0.2T_n$ a $1.5T_n$), el valor de R y los factores de sitio mencionados, se obtuvo el espectro escalado para diferentes casos, los cuales son comparados con el espectro de diseño obtenido al aplicar el ERN 2012.

6.1 Estructura de período corto

Para la estructura de dos pisos, cuyo periodo de vibración fundamental T_n es de 0,67, se obtuvieron los siguientes factores:

Tabla 1 Factores de escalamiento encontrados en estructura de 2 pisos

SISMO	SF_1	SF_2	SF
ux corralitos	0,1508	1,6112	0,2430
uy corralitos	0,1508	1,6112	0,2430
ux Newhall	0,1000	1,6112	0,1611
uy Newhall	0,1333	1,6112	0,2148
ux Sylmar	0,1048	1,6112	0,1689
uy Sylmar	0,1475	1,6112	0,2377
ux Lucer	0,1041	1,6112	0,1677
uy Lucer	0,1000	1,6112	0,1611
ux jma	0,1000	1,6112	0,1611
uy jma	0,1058	1,6112	0,1705

Cada uno de los espectros de respuesta de aceleraciones se multiplicó por el factor *SF* correspondiente. Se observa que el valor del factor SF_2 es de 1,61, por lo que al multiplicar este factor por SF_1 se obtiene un espectro demasiado alto, como se indica en la figura 6. En la figura 7 se observa el sismo escalado utilizando únicamente el factor SF_1; en ciertos sectores se observan valores menores al espectro objetivo.

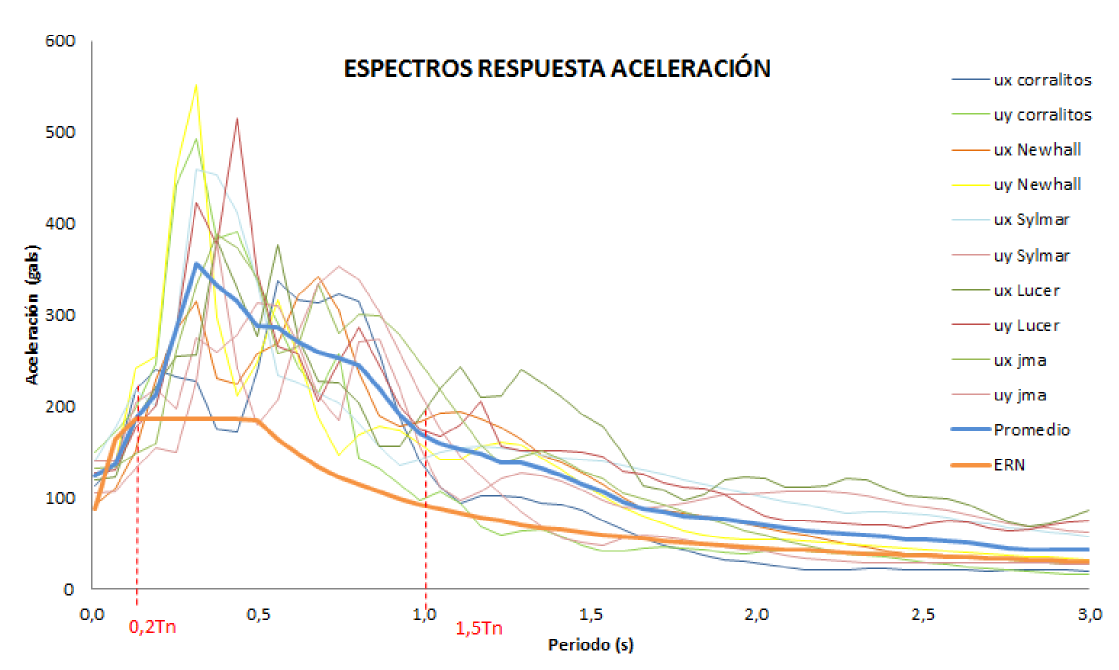


Figura 6 Espectro de respuesta escalado con factor *SF.* Estructura de 2 pisos.

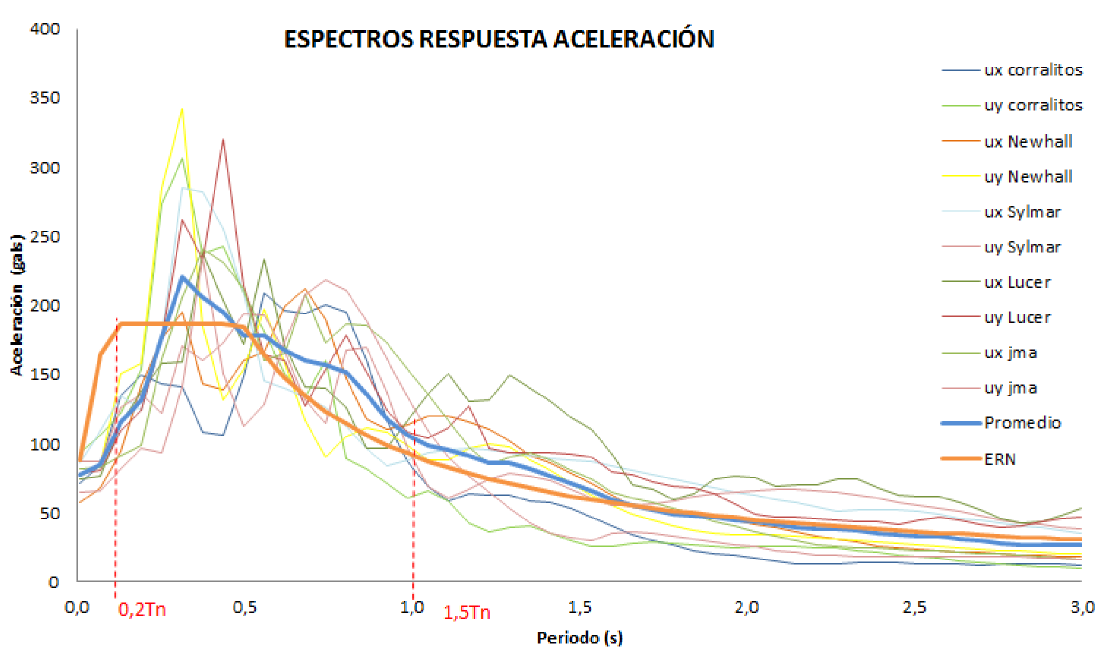


Figura 7 Espectro de respuesta escalado con factor SF_1. Estructura de 2 pisos

6.2 Estructura de período alto

Para la estructura de ocho pisos, cuyo periodo de vibración fundamental T_n es de 1,47, se obtuvieron los siguientes factores:

Tabla 2 Factores de escalamiento encontrados en estructura de 8 pisos

SISMO	SF1	SF2	SF
ux corralitos	0,2102	1,0480	0,2203
uy corralitos	0,2177	1,0480	0,2281
ux Newhall	0,1000	1,0480	0,1048
uy Newhall	0,1387	1,0480	0,1454
ux Sylmar	0,1000	1,0480	0,1048
uy Sylmar	0,1307	1,0480	0,1370
ux Lucer	0,1000	1,0480	0,1048
uy Lucer	0,1000	1,0480	0,1048
ux jma	0,1000	1,0480	0,1048
uy jma	0,1312	1,0480	0,1375

En la figura 8 se encuentra graficado el escalamiento utilizando el factor *SF* y en la figura 9 utilizando únicamente SF_1; se observa que no existe una mayor diferencia entre ambos escalamientos en vista de ser el factor SF_2 muy pequeño.

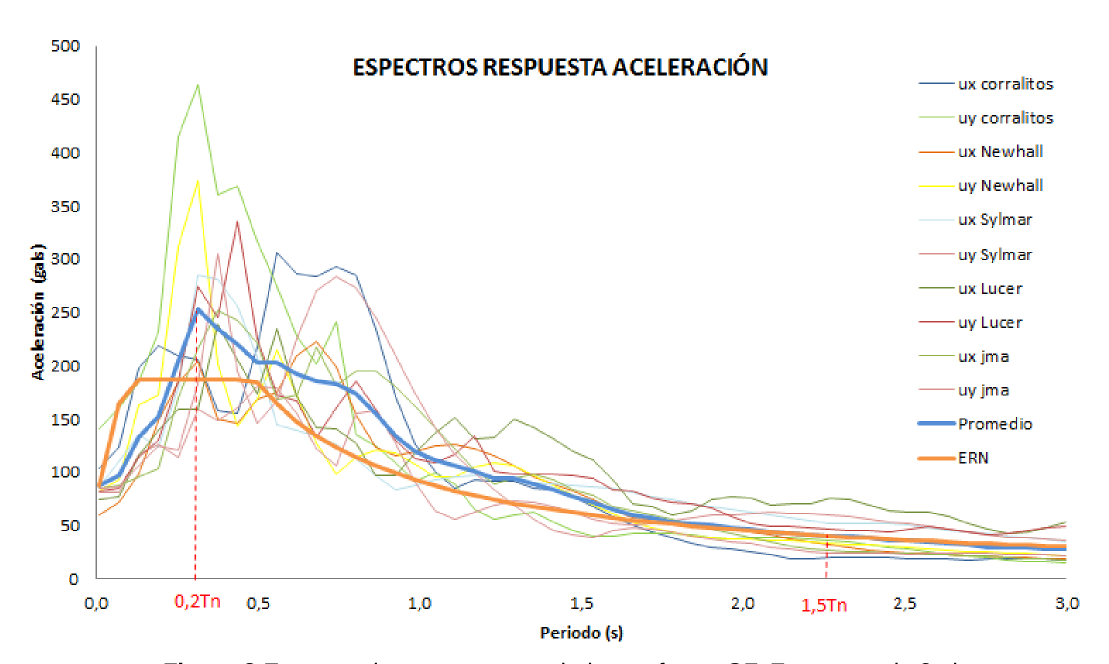


Figura 8 Espectro de respuesta escalado con factor *SF*. Estructura de 8 pisos

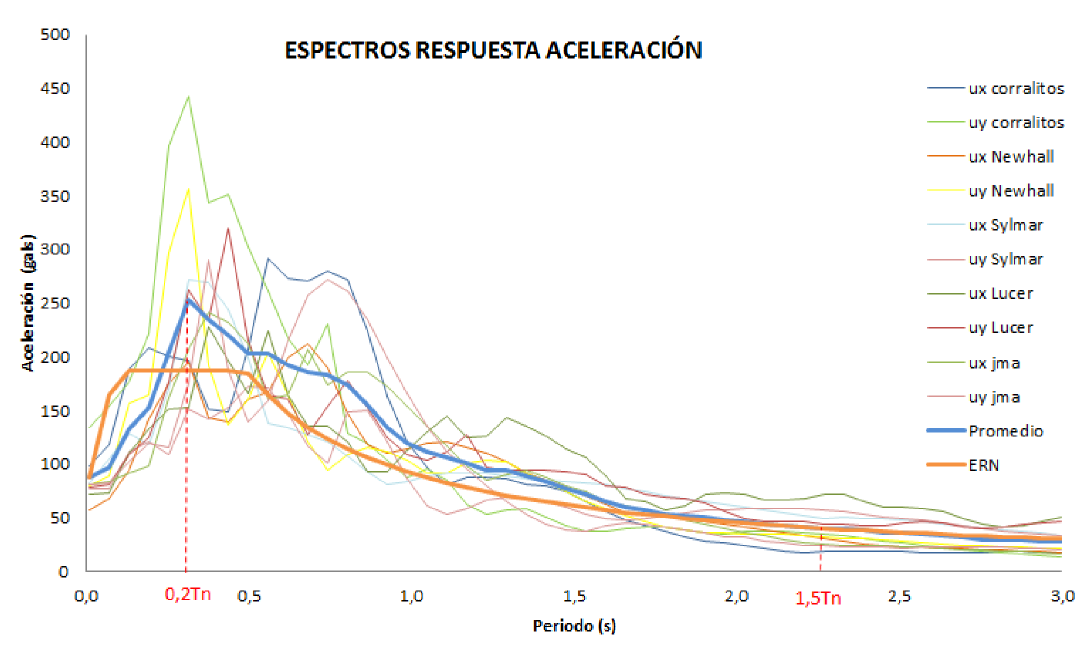


Figura 9 Espectro de respuesta escalado con factor SF_1 . Estructura de 8 pisos.

Considerando que se realizó el análisis en tres dimensiones, se obtuvo el espectro SRSS calculando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las dos componentes horizontales de los sismos para la estructura de ocho pisos. Escalando cada par de registros con el mismo factor, se obtuvo:

Tabla 3 Factores de escalamiento encontrados en estructura de 8 pisos. Pero trabajando con acelerogramas SRSS

SISMO	SF_1	SF_2	SF
corralitos	0,1435	0,8274	0,1187
Newhall	0,1000	0,8274	0,0827
Sylmar	0,1000	0,8274	0,0827
Lucer	0,1000	0,8274	0,0827
jma	0,1000	0,8274	0,0827

En la figura 10 se puede apreciar el escalamiento de los espectros SRSS. Este sismo escalado es similar al obtenido utilizando los componentes horizontales de los registros sísmicos.

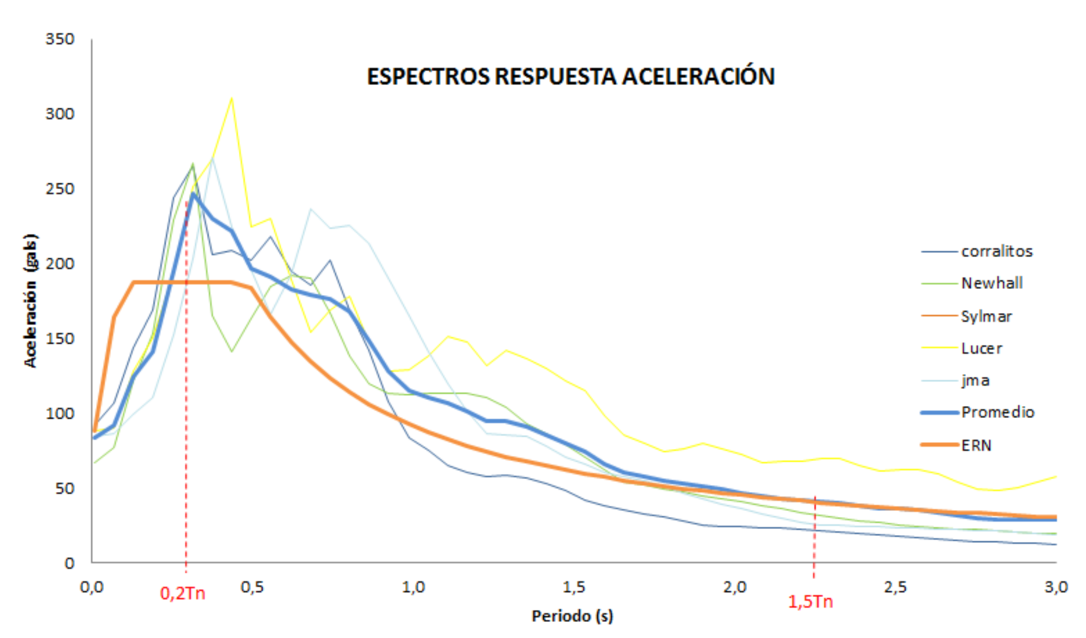


Figura 10 Espectro de respuesta SRSS escalado. Estructura de 8 Pisos.

7 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Definitivamente obtener acelerogramas sintéticos compatibles a todo el espectro no es lo más adecuado, ya que los acelerogramas encontrados van a encontrar las respuestas máximas en una cantidad muy grande de puntos de acuerdo al periodo. Por este motivo es que en la última década ha tenido gran desarrollo la obtención de acelerogramas sintéticos compatibles con un espectro de diseño, pero en un cierto rango de periodos; rango en el cual muy probablemente la estructura va a trabajar.

En base a los periodos obtenidos en dos estructuras, una de las cuales tiene periodo corto y la otra un periodo largo, se ha visto que en la primera estructura da mejores resultados considerar solo la norma Euclidea. En cambio en la estructura de periodos altos si se debe aplicar los dos factores para el escalamiento. De todas formas se ha visto buenos resultados emplear únicamente la norma euclidea para cualquier tipo de estructura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguiar R., (2012) *Dinámica de estructuras con CEINCI-LAB*, Sangolquí: Centro de Investigaciones Científicas Escuela Politécnica del Ejército, Quito.

2. Aguiar, R., (2013) *Microzonificación Sísmica de Quito*, Sangolquí: Centro de Investigaciones Científicas Escuela Politécnica del Ejército, Quito

3. Aguiar, R., García, H., (2013) *Escalamiento de sismos para construir Acelerogramas compatibles con un espectro,* Quito: Primer Congreso Internacional Ciencias de la Tierra y de la Construcción, Quito.

4. Chan S., Ruiz, S., Montiel, M., (2005) *Escalamiento de Acelerogramas y número mínimo de registros requeridos para el análisis de estructuras,* México: Revista de Ingeniería Sísmica, núm. 72.

5. ERN-2012, *Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito: Estudio de la amenaza sísmica a nivel local.* Quito: Programa para la reducción de riesgos urbanos.

6. NEC-11, *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, Cámara de la Construcción de Pichincha.

7. Reyes J., Kalkan, E.,(2011) *Número de registros sísmicos para el procedimiento de escalamiento ASCE 7,* Medellín: V Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Medellín, Colombia.